Observation de la transition entre la phase liquide et la phase gazeuse au point critique

Objectifs expérimentaux

- Observation de la disparition de la ligne de séparation entre la phase liquide et la phase gazeuse sous l'action de la chaleur, à une température supérieure à la température critique
- Observation de la formation de la limite de phase lors du refroidissement à une température inférieure à la température critique
- Observation de l'opalescence critique

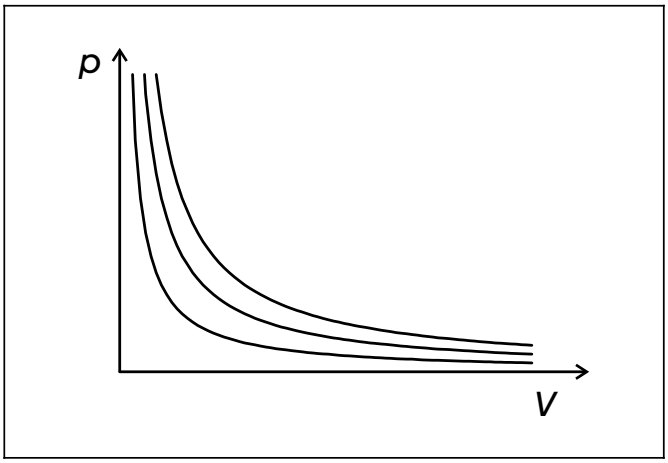
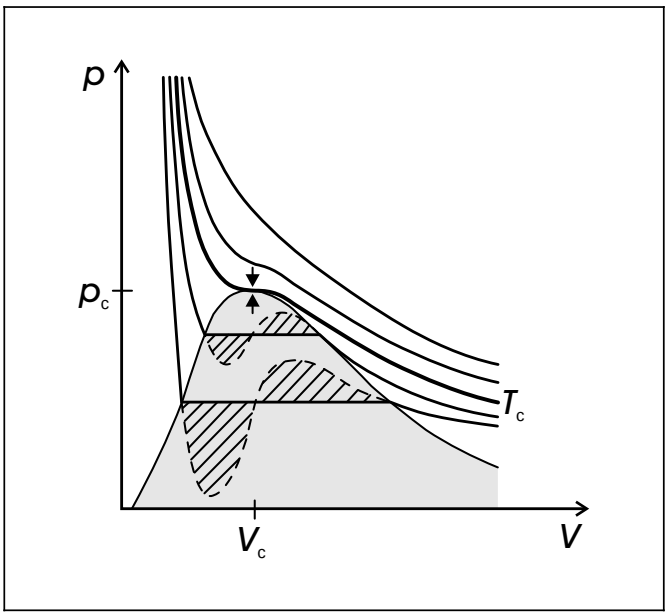


Fig. 1: Diagramme *pV* avec les isothermes d'un gaz parfait

Fig. 2: Diagramme *pV* avec les isothermes d'une substance réelle. Il y a un mélange liquide-vapeur dans le domaine de la surface sur fond gris. Les deux petites flèches indiquent le point critique.



Principes de base

Un gaz parfait se caractérise par le fait qu'il ne se condense pas lors du refroidissement jusqu'au zéro absolu. Cela n'est jamais le cas dans la nature puisqu'il faudrait que le gaz soit constitué de particules ayant la particularité d'être petites en comparaison avec leur écartement moyen, même à basse température, et, mis à part les chocs élastiques, de n'exercer aucune interaction entre elles. Si un gaz parfait est comprimé à température constante, l'augmentation de la pression est inversement proportionnelle à celle du volume (voir fig. 1). Le rapport entre la pression *p*, la température *T* et le volume moléculaire *V* d'un gaz parfait est décrit par l'équation d'état pour les gaz parfaits:

$$pV = RT \qquad \text{(I)}$$

($R = 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$: constante du gaz)

La plupart des gaz réels se rapprochent des propriétés du gaz parfait s'ils sont suffisamment éloignés de leur point de condensation ou de liquéfaction, par ex. à température ambiante et pour une pression atmosphérique. A proximité du point de condensation, donc sous une pression *p* élevée ou à basse température *T*, les propriétés diffèrent néammoins nettement de celles du gaz parfait. La densité du gaz augmente et les particules ne sont en moyenne plus trop éloignées les unes des autres. Le comportement de gaz réels est donné approximativement par l'équation d'état de *Van der Waals*

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)\cdot(V - b) = RT \qquad \text{(II)}$$

Les constantes de *Van der Waals a*, *b* subordonnées à la substance tiennent ici compte de l'attraction mutuelle des particules gazeuses et de leur volume propre.

La fig. 2 montre les isothermes d'un gaz parfait dans un diagramme *pV*. L'isotherme au point de flexion duquel il est possible d'appliquer une tangente horizontale a une signification particulière. Le point de flexion est caractérisé de point critique, les grandeurs faisant partie de ce point sont la pression critique p_c, le volume moléculaire critique V_c et la température critique T_c. Au-delà de la température critique, la substance est gazeuse quelque soit la pression et les isothermes suivent l'équation de *Van der Waals* qui se rapproche là de l'équation d'état pour les gaz parfaits. La substance est caractérisée de gaz.

Matériel

1 chambre de pression pour la température critique	371 401
1 ampoule, 6 V/30 W	450 51
1 carter de lampe	450 60
1 condenseur asphérique	460 20
1 transformateur, 6 V-, 12 V-, 30 VA	562 73
1 petit banc d'optique	460 43
1 lentille dans monture, f = +100 mm	460 03
1 prisme à réflexion totale avec support	461 11
4 noix Leybold	301 01
1 grand pied en V	300 01
comme chauffage:	
1 thermostat de circulation 30 °C ... 100 °C	666 768
2 tuyaux en silicone, ∅ int. 7 × 1,5 mm, 1 m	667 194
ou	
1 générateur de vapeur 550 W/230 V	303 28
1 tuyau en silicone, ∅ int. 7 × 1,5 mm, 1 m	667 194
1 bécher 400 ml	664 104
pour la mesure de la température:	
1 thermomètre numérique avec un raccord	666 190
1 sonde de température NiCr-Ni	666 193
ou	
1 thermomètre, -10 à 150 °C par ex.	382 33

En dessous de la température critique, les relations sont plus compliquées. Pour un volume suffisamment grand (sur la fig. 2, à droite de la surface sur fond gris), la substance est gazeuse et caractérisée de vapeur. Pour un très petit volume (à gauche de la surface sur fond gris), la substance est liquide et quasiment incompressible. Dans le domaine de la surface sur fond gris, il y a un mélange liquide-vapeur avec une part de vapeur qui augmente de gauche à droite. L'équation de *Van de Waals* diffère ici de la réalité car suite au changement de volume à température constante, il n'y a que la part de vapeur du mélange qui varie, pas sa pression. Les sections de courbe tracées en pointillés qui correspondent à l'équation de *Van de Waals* doivent être remplacées par des droites horizontales. Celles-ci indiquent la pression de la vapeur pour laquelle la vapeur et le liquide sont en équilibre. Etant donné que le liquide et la vapeur n'ont pas la même densité, ils sont séparés l'un de l'autre dans un champ de gravitation. La densité de la vapeur augmente au fur et à mesure que la température augmente, celle du liquide diminue. A la température critique, les deux densités coïncident. Le liquide et la vapeur ne peuvent ici plus se différencier et sont parfaitement mélangés.

Aux abords du point critique, la diffusion de la lumière à l'intérieur de la chambre de pression devient particulièrement grande. Il s'agit là du phénomène dit opalescence critique. Cette opalescence critique repose sur des variations de densité qui augmentent fortement à proximité du point critique parce que la compressibilité est grande à cet endroit-là et la résistance par rapport aux variations de densité très faible. La lumière d'ondes assez courtes est diffusée alors que celle d'ondes longues reste dans la marche des rayons.

De tels comportements peuvent être démontrés avec la chambre de pression pour la température critique. Pour le chauffage, la gaine de la chambre de pression est remplie d'eau chaude ou de vapeur d'eau chaude. Les deux plaques de verre plan résistantes à la pression permettent d'observer le comportement de la substance insérée à l'intérieur de la chambre lors du dépassement de la température critique T_c sous l'action de la chaleur puis finalement, au refroidissement. Les processus s'observent soit directement dans la chambre, soit par projection sur un mur.

La chambre de pression contient de l'hexafluorure de soufre SF_6. Sa densité critique - il s'agit de la valeur inverse du volume critique - coïncide à température ambiante à peu près bien avec la moyenne de la densité du liquide et de la densité du gaz. C'est à température ambiante que la chambre de pression a été à peu près à moitié remplie avec du gaz liquéfié, de telle sorte qu'il y ait un passage par le point critique de garanti en cas d'augmentation de la température.

Voici les valeurs des variables thermodynamiques au point critique pour le SF_6:

Température critique: $T_c = 318{,}7$ K

Pression critique: $p_c = 37{,}6$ bar

Volume moléculaire critique: $V_c = 200 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$.

Remarques de sécurité

La chambre de pression pour la température critique est soumise à une haute pression (au moins 20 bars)

- Observez les conseils de sécurité du mode d'emploi.
- Ne desserrez en aucun cas les vis de fermeture.

Les joints utilisés pour étanchéiser les plaques servent de valve de sécurité en cas de surchauffe particulièrement importante. Leur température d'utilisation maximale est de 100 °C.

- Pour la garantie d'une grande longévité des joints, éviter si possible de chauffer la chambre de pression à plus de 90 °C.

Tout particulièrement en cas de chauffage avec le générateur de vapeur, il y a risque de brûlure et d'échaudure auprès de la chambre de pression, du générateur de vapeur, des tuyaux et du récipient collecteur.

- Eventuellement observer les conseils de sécurité du mode d'emploi du générateur de vapeur (303 28).
- Ne pas toucher l'appareil expérimental tant qu'il est chaud.

Montage

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 3.

Remarque quant à l'utilisation du générateur de vapeur:
Couper le tuyau en silicone en deux morceaux de 0,5 m de long afin d'éviter la formation de condensat dans le tuyau.

– Avant de raccorder les tuyaux, vérifier que le passage dans la conduite chauffante de la chambre de pression soit bien dégagé (en soufflant dedans).

– Pour améliorer le contact thermique avant d'insérer la sonde de température dans le trou approprié, ajouter par ex. un peu d'eau.

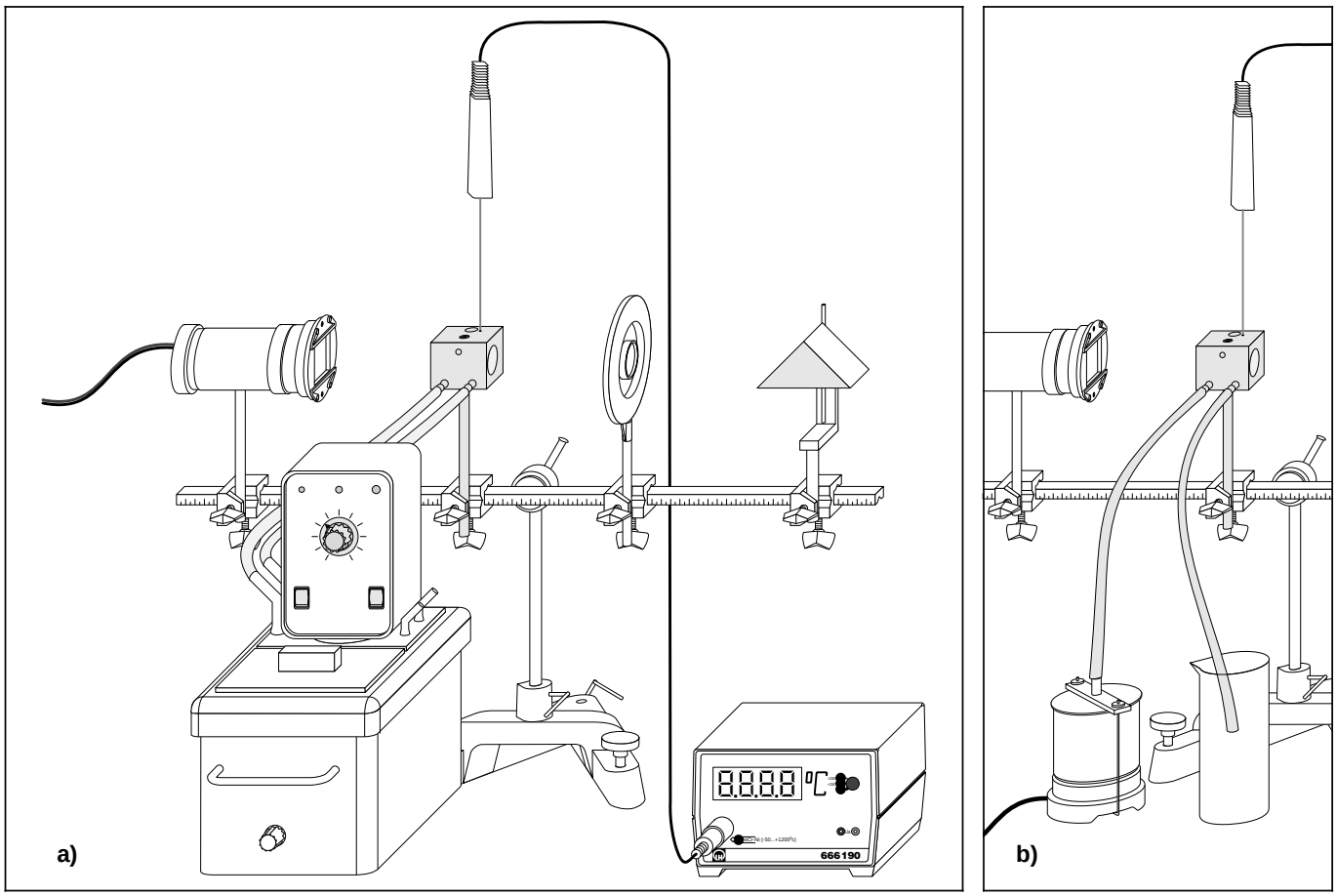


Fig. 3: Montage expérimental pour l'observation du point critique:

a) montage complet avec le thermostat de circulation pour le chauffage de la chambre de pression. La position exacte des divers composants sur le banc d'optique dépend de l'éloignement de la surface de projection et peut être trouvée par simple déplacement de la lentille.

b) partie du montage avec le générateur de vapeur pour le chauffage de la chambre de pression.

– Monter le condenseur asphérique sur le carter de lampe.
– Réaliser le montage conformément à la fig. 3 de façon à ce que la lampe, les plaques de verre plan de la chambre de pression, la lentille et le prisme à réflexion totale soient sur un même axe.
– Vérifier que les tuyaux soient bien branchés avant chaque mise en service pour qu'il ne s'échappe fortuitement ni vapeur d'eau chaude, ni eau chaude et qu'il n'y ait donc aucun dégât de causé.
– Brancher la lampe au transformateur et projeter le contenu de la chambre de pression sur une surface claire (par ex. sur une feuille de papier blanc accrochée au mur). Si besoin est, réajuster le dispositif.
– En déplaçant la lentille sur le petit banc d'optique, faire en sorte que le ménisque soit projeté avec netteté.

Réalisation

Remarques concernant l'utilisation du générateur de vapeur:

Si on chauffe avec de la vapeur d'eau, la température dans la chambre de pression atteint très rapidement le point critique et n'est que difficilement contrôlable. L'eau ne doit pas bouillir trop fortement dans le récipient pour que l'eau et la vapeur ne soient pas amenées ensemble dans la conduite chauffante.
Ne remplir le récipient du générateur de vapeur avec de l'eau qu'au maximum sur 2 cm.
Arrêter le générateur de vapeur dès que l'eau se met à bouillir. Ne pas plonger dans l'eau de condensation l'extrémité du tuyau dans le bécher afin d'éviter au refroidissement que le condensat froid soit aspiré, sous peine de risquer de détériorer la chambre de pression par choc thermique.

La description suivante concerne l'utilisation du thermostat de circulation.

– Obscurcir la pièce pour l'observation de l'image projetée.
– Mettre le thermostat de circulation en service et le régler dans un premier temps sur 40 °C.
– A partir de 40 °C, lentement augmenter la température de consigne sur le thermostat de circulation afin de garantir un échauffement assez uniforme de la substance et de pouvoir parfaitement bien observer la disparition de la limite de phase.
– Une fois la température critique dépassée, régler la température de consigne du thermostat de circulation en-dessous de la température critique.
– Afin de réduire les influences de gradients de température perturbateurs au-dessus du volume de la chambre, éventuellement à nouveau lentement augmenter la température de consigne après qu'elle soit descendue en-dessous du point critique puis recommencer l'expérience.

Exemple de mesure et exploitation

L'apparition des phénomènes décrits ci-après dépend de la vitesse à laquelle la température critique est dépassée. Les effets produits lorsque la chambre de pression est chauffée surviennent en cas d'utilisation du thermostat de circulation, la réaction est plus forte et plus rapide si on utilise le générateur de vapeur.

Chauffage:

Peu après que l'on ait commencé à chauffer, il se forme des stries dans la phase liquide. Ensuite, le liquide se met à bouillir et le condensat goutte de la paroi supérieure de la chambre de pression. Finalement, on assiste aussi à la formation de stries dans la phase gazeuse, notamment au niveau de la couche limite.

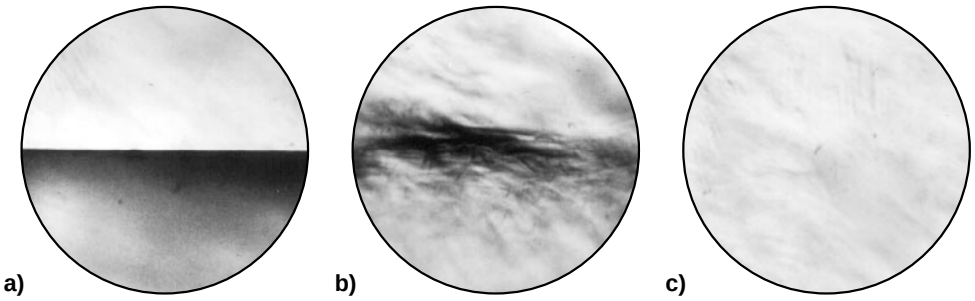


Fig. 4: Représentations du contenu de la chambre de pression:
a) au-dessous de la température critique
b) à la température critique (disparition de la limite de phase)
c) au-dessus de la température critique

Juste avant que la température critique soit atteinte, l'eau bout tellement fort que la diffusion de la lumière par le liquide non-homogène est diffuse à cause des bulles de gaz. L'image projetée de la phase liquide est ainsi plus foncée. La formation de stries s'intensifie, c.-à-d. tout d'abord dans la phase gazeuse juste au-dessus de la couche limite, puis dans toute la phase gazeuse et finalement aussi dans la phase encore liquide.

En cas de dépassement lent de la température critique, la limite de phase entre le liquide et le gaz s'agite, s'élargit et finit par disparaître entièrement. La phase liquide semble être légèrement marron peu avant la disparition de la couche limite. L'image projetée permet d'observer cette disparition de la ligne de séparation entre la phase liquide et la phase gazeuse. Ensuite, l'image s'éclaircit à nouveau puisqu'il y a désormais une phase homogène dans la chambre. Il y a de fortes turbulences dans la chambre de pression avec formation de stries qui s'estompent légèrement au fur et à mesure que la température augmente. Ces turbulences sont le résultat de gradients de température dans la chambre de pression.

Refroidissement:

Une fois le chauffage arrêté, les stries disparaissent d'abord presque complètement, leur formation s'intensifiant néammoins à nouveau aux abords de la température critique. Au fond du récipient, on observe un léger assombrissement consécutif à la formation de brouillard. Tout le contenu de la chambre de pression semble de plus en plus rouge-marron (opalescence critique) et il continue de se former de plus en plus de stries. Puis d'un coup, cela devient subitement sombre à l'intérieur de la chambre de pression, le gaz se condense et on observe une hausse du niveau du liquide. Dans la phase gazeuse, il y a du brouillard qui se condense peu à peu. Finalement, la phase gazeuse devient de plus en plus claire, la phase liquide bout encore.

Nouveau chauffage:

Le liquide se remet à bouillir plus fortement, ensuite la phase gazeuse semble légèrement jaune et la phase liquide rouge-marron (opalescence critique). La limite de phase s'élargit et finit par complètement disparaître. Juste au-dessus de la température critique, la totalité du contenu de la chambre de pression devient uniformément jaune-marron, phénomène s'accompagnant d'une intense formation de stries et de violentes turbulences. Pour finir, la gamme de température dans laquelle se manifeste la température critique est dépassée et dans la chambre de pression, on ne voit plus que les stries occasionnées par les turbulences.

© by Leybold Didactic GmbH
Printed in the Federal Republic of Germany
Technical alterations reserved